云 南 植 物 研 究 2007，29 (1)：51～57
Acta Botanica Yunnanica

# 川渝地区马先蒿属物种丰富度空间分布格局及其影响因素*

王 静[1,2]，唐 亚[1**]，夏怡凡[3]，张立芸[1]
(1 四川大学环境系，四川 成都 610065；2 西华师范大学珍稀动植物研究所，四川 南充 637002；
3 四川大学数学学院，四川 成都 610064)

**摘要**：对川渝地区马先蒿属植物的物种多样性分布格局进行了较为系统的研究，川渝地区共有马先蒿属植物 181 种，分属于 11 个群 70 个系，其物种多样性在川渝地区呈现西高东低的分布格局，物种多样性水平在海拔 3 500～4 000 m 最高。在 SPSS 软件的支持下，运用因子分析法和相关分析法定量分析川渝地区 148 个单元格内主要环境因素与马先蒿属物种多样性分布之间的关系，表明熊蜂物种丰富度、海拔高度和≥15℃的积温依次是影响川渝地区马先蒿属物种多样性分布格局最重要的生态环境因子。熊蜂物种丰富度和海拔高度与马先蒿物种丰富度呈正相关，熊蜂对马先蒿属植物的繁殖成功与否起着关键的作用；诸多温度因子中，≥15℃积温对马先蒿属物种多样性分布影响最大，与马先蒿属物种丰富度呈负相关，这与它喜好高海拔地区寒冷的环境相一致。

**关键词**：马先蒿属；丰富度；川渝地区；环境因子；因子分析
**中图分类号**：Q 948　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0253-2700 (2007) 01-051-07

# Geographical Pattern of Species Richness of *Pedicularis* (Scrophulariaceae) in Sichuan and Chongqing and Its Relationship with Main Environmental Factors

WANG Jing[1,2]，TANG Ya[1**]，XIA Yi-Fan[3]，ZHANG Li-Yun[1]
(1 *Department of Environmental Sciences*，*Sichuan University*，Chengdu 610065，China；2 *Institute of Rare Wild Life*，*China West Normal University*，Nanchong 637002，China；3 *College of Mathematics*，*Sichuan University*，Chengdu 610064，China)

**Abstract:** The distribution pattern of species diversity of *Pedicularis* in Sichuan and Chongqing，including both geographical and altitudinal pattern，and its relationship with main environmental factors are studied. Following Tsoong's system，there are 181 species in 70 series of 13 groups (as "grexes") now recognized within the genus in Sichuan and Chongqing. The richness of *Pedicularis* in west of Sichuan is richer than in east of Sichuan. The richness of *Pedicularis* is richest in altitude 3 500-4 000 m. With use of GIS，biographic statistics and SPSS，spatial quantitative analysis，correlation analysis，relationship between main environmental factors in 148 counties in Sichuan and Chongqing and geographical species diversity pattern of *Pedicularis* is analysed in order to find out the principal factors which influence the present pattern of species diversity of *Pedicularis*. The result suggests that the high species diversity of *Pedicularis* in western Sichuan is closely related to species richness of bumblebees，altitude and ≥15℃ accumulated temperature，implying that *Pedicularis* might not grow normally in the environment with long warm duration，which is also supported by the flourishing of *Pedicularis* in cold environment in alpine and subalpine areas.

**Key words:** *Pedicularis*；Richness；Sichuan and Chongqing；Factor analysis；Environmental factors

---

* 基金项目：国家自然基金项目 (40171038)；西华师范大学科研启动基金 (05B038)
** 通讯作者：Author for correspondence；E-mai：tangya999@gmai.com
收稿日期：2006-04-25，2006-09-03 接受发表
作者简介：王静 (1981-) 女，汉族，四川冕宁人，助教，硕士，研究方向：生态环境及生物多样性，现在工作单位：西华师范大学生命科学学院。

马先蒿属（*Pedicularis* L.）是玄参科（Scrophulariaceae）或列当科最大的一个属，也是被子植物的大属之一（钟补求，1963），约600余种，集中分布在北半球，极少数超越赤道，多数种类生长在寒带及高山，适应于寒冷、湿润的气候(钟补求，1963；Mill，2001)。马先蒿属植物具有药用和观赏价值，并以其物种的多样性、花冠形态的多样性及其与传粉昆虫的密切关系成为传粉生态学研究的一个经典材料。川渝地区特别是四川西部和西北部马先蒿属植物种类异常丰富，具有马先蒿属的各种演化类型，但对如此丰富的物种多样性与环境关系的研究，尚未见报道。王红和李德铢（1999）曾对云南西北部高黎贡山的马先蒿属物种多样性进行过讨论。本文研究马先蒿属物种丰富度在川渝地区的空间分布格局规律以及影响马先蒿属物种丰富度分布格局的主要环境因子，以期为该属植物的生物地理学研究和生物多样性保护提供基础资料。马先蒿属的很多种类出现在草地逆向演替的过程中，属于高山和亚高山草甸群落中的杂类草片层，牛羊不食用马先蒿属植物，牧民认为马先蒿属植物是杂草和毒草，对畜牧业来说，马先蒿属植物的大量出现会使草地利用价值遭受重大损失，因此，研究川渝地区马先蒿属物种丰富度分布格局及其环境因子关系可以为牧场防除马先蒿、防治草地退化提供基础资料。马先蒿属有许多种类分布在青藏高原的亚高山和高山草甸上，是一种典型的亚高山、高山植物，其系统进化过程研究较清楚，系统演化阶段的种类大多存在，是研究全球气候变化对亚高山-高山植物影响的好材料。本文可以为探索第四纪以来全球气候变化中青藏高原上的物种分化，适应性进化与空间分布格局发生变化提供基础资料，为探索青藏高原高寒草甸生态系统对全球气候变化的响应方式、响应途径、作用过程、动力机制及未来可能的变化趋势，从而为保障青藏高原的碳安全、生物安全提供科学依据。马先蒿属植物许多种类具有观赏价值、药用价值，但至今没有大规模人工引种栽培成功的报道，本研究可以为引种马先蒿属植物提供科学依据，使选择引种的目标植物和地域更加合理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

川渝地区地处我国西南部，位于北纬26°02′～34°20′，东经97°30′～110°10′，面积569 000 km$^2$，西起青藏高原，东达华中地区，北有秦岭和大巴山，南至云贵高原；在大地构造上分为西部高原和东部盆地两大部分，西部高原属于青藏高原的东延地区，而东部盆地是扬子准地台的主体，区域内山川河流纵横交错，地势地貌复杂多样。气候为亚热带季风气候类型，但受地貌地形影响，各地气候相差很大，大致以盆地西缘山地为界，可以分为东西两个地区，东部四川盆地属于较典型的中亚热带和北亚热带季风湿润气候，年平均气温14℃～19℃，比同纬度地区高1℃；西部地区为山地高原气候，年均温2℃～8℃，即使七月均温也只有12℃～16℃，一月均温更低至-2℃～-10℃；年降水量呈东南向西北递减的趋势。全年日照东部与西部也有很大的区别，东部盆地是全国日照最少的地区，西部高原则属全国光能丰富区之列（四川省测绘局，1984）。

### 1.2 材料来源

材料主要来源于中国科学院有关植物标本馆馆藏标本和有关科研机构、大学校园的馆藏标本的采集记录(包括拉丁名、采集人、采集地点、采集号、海拔高度、生境和形态特征)，主要有四川大学植物标本馆、昆明植物所标本馆、四川凉山州药检所、华南植物园。此外还有国内外有关马先蒿属植物记载的文献、作者在川渝地区进行野外调查获得的标本资料（标本存于四川大学环境学院生物多样性与环境实验室)；在材料来源上，川西地区植被 植物调查与标本采集强度比较高，而东部盆地内部与高山上部（4 500～4 700 m以上）强度低，因此，获得的川渝西部地区有关马先蒿属资料可能比东部地区更全面。气象资料没有采用川渝地区各县气象站的气象数据而采用的是四川省1951年～1980年气象数据的多年平均值，这是因为大多数川西横断山区县的气象站设在河谷，而河谷气候显然不能代表整个县的气候一般情况，而多数马先蒿植物种也不分布于河谷地带，若利用各县站气候相关参数直接用于马先蒿物种丰富度分析会导致误差。本文采用的气象数据为30年的多年平均值，而1951～1980年30年平均值与1971～2000年30年多年平均值无大的差异（王馥棠，2003)，利用此气象数据进行马先蒿物种丰富度分析更加科学。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 川渝地区马先蒿属植物区系丰富度格局** 在马先蒿属内曾用过不同的属下等级（Li，1948，1949)，但钟补求（1955，1956 a，b，1963）系统提供了整个属的系统框架，本文按钟补求（1963）系统，从群（Groups)、系(Series)、种（Species）叙述其在川渝地区的分布格局。

**1.3.2 川渝地区马先蒿属植物种丰富度空间分布格局**

现有的标本资料和文献大多以县或乡级行政区为采集地名称，缺乏详细的地理坐标。因此，在借助 GIS 进行物种的分布资料整理时，以县或乡一级行政区划为基础进行地理坐标的转换，将核实的分布点转换为地理坐标；利用 Microsoft Excel 软件建立川渝地区马先蒿属的地理分布数据库，运用 GIS（Mapinfor）软件将核实的地理坐标绘制在数字化后的川渝地区行政区划图上，获得川渝地区马先蒿物种分布图，进行马先蒿属植物种丰富度空间分布格局分析。运用 EXCELL 软件获得川渝地区不同海拔高度带马先蒿物种频次分布图，对不同垂直带马先蒿属物种丰富度垂直分布格局进分析。

1.3.3　川渝地区马先蒿属植物种丰富度与环境因子的关系

为了全面、系统地分析影响川渝地区马先蒿属的丰富度分布格局的因子，往往要考虑众多对马先蒿属植物生长、繁殖有影响的因素，本研究在 GIS 软件支持下，将四川省和重庆市行政区划图（1∶3 000 000）数字化，并主要以县作为划分单元划分成 148 个地理单元格，记录这 148 个单元格内马先蒿的物种数，录入年平均气温、7 月最低气温、日较差、≥0℃积温、≥5℃积温、≥10℃积温、≥15℃积温、相对湿度、年降雨量、全年日照时数、七月平均温度、一月平均温度、地面温度、最热月平均最高气温和最冷月平均最低气温（这些数据均为多年平均值），录入各县分布的熊蜂物种数、平均海拔高度，将各个数据进行标准化处理后得到拥有 18 个变量的数据库。因子分析方法多用于分析环境监测中的数据（蔡启铭等，1995；于书霞等，2001；吕唤春等，2002），其主要原理是以多个变量之间的相互关系为基础，利用数学工具可以把原来多个旧变量组合成少数独立的新变量——因子，用较少具有代表性的因子来概括多变量所提供的信息，找出影响监测数据的主要因素，反映环境间内在的关系（裴鑫德，1991），而本研究的目的是在选取的众多环境因子中找出影响马先蒿物种丰富度的主要因素，而且所选取的因子之间也存在复杂的关系，因此采用 SPSS8.0 软件对进行标准化后的数据库进行因子分析，得到影响川渝地区马先蒿丰富度空间分布格局的综合因子。要分析环境因子对生物地理分布的影响，通常采用简单相关分析法（杨元合等，2004；司马永康等，2004），但是简单相关分析法计算两个变量间线性关系的程度，往往因为第三个变量的作用，使相关系数不能真正反映两个变量间的线性程度，偏相关分析就是在研究两个变量之间的线性相关关系时考虑可能对其产生影响的变量，得到真正具有线型相关关系的变量，因此先用 SPSS8.0 软件中简单相关分析法分析马先蒿物种丰富度与其它 17 个因子的相关性，得到马先蒿丰富度和各环境因子相关矩阵，再选取马先蒿丰富度和各环境因子相关矩阵中影响值大的因子与马先蒿物种丰富度分别求偏相关，得到影响马先蒿物种丰富度最主要的环境因子。

## 2　结果分析

### 2.1　马先蒿属植物区系丰富度格局及特点

2.1.1　**群的分布**　马先蒿属共分为 13 个群，在我国都有分布，其中 11 个群，即长茎群、长叶群、斗叶群、短叶群、多裂叶群、根叶群、旌节群、马先蒿群、无枝群、之型花群、直管群在川渝地区有分布，主要分布于川渝西南部及西部；多裂叶群（*Polyschistophyllum* Group）是最小的一群，为中国特有，分布于川渝西南部、云南西北部和西藏东部（钟补求，1956b）。

2.1.2　**系的分布**　马先蒿属分为 138 个系，112 个系在我国有分布，其中 36 个系为中国特有；分布在川渝地区的有 70 个系，其中轮叶系和长花系的种类最多，分别有 21 种和 16 种；5 个系，即双生系（Ser. *Binariae*）、新粗管系（Ser. *Neolatitubae*）、纤细系（Ser. *Graciles*）、拟斗叶系（Ser. *Cyathophylloides*）、甲拉系（Ser. *Kialenses*）为川渝地区特有，主要分布在四川川西部雅江、西北部松潘和西南部木里等地。

2.1.3　**种的分布**　我国有 357 种马先蒿，川渝地区有 181 种，占整个属种数的 30%，占中国种数的 51%。

川渝地区马先蒿属多数种类（包括亚种、变种和变型，下同）分布于四川西北部和西南部，在木里、康定、雅江、小金、理县、黑水、松潘这一线集中呈带状分布，向西和向东依次减少，川渝东部盆地几乎不见马先蒿的踪迹。处于四川西北部高原和西南部高原两个植物地理分区的康定县、雅江县和木里县的马先蒿物种丰富度最高，有 65～80 种之多，其次为处于西北部盆地山谷的松潘、红原、马尔康、理县、金川和西部山地稻城、乡城，马先蒿物种数为 21～30 种；川西南地区马先蒿物种丰富度不如川西地区，如在冕宁、西昌、布拖、宁南、马边和屏山仅有 1～10 种马先蒿分布；川渝东部地区仅有彭水、彭州、巫溪、南川、城口和万源分布有 1～10 种马先蒿，川东其余地区如广元、南部、忠县、万县、巫山、江北、宜宾、乐山等还没有马先蒿分布的记录（图 1）。综上所述，马先蒿物种丰富度在川渝地区呈现出西高东低的分布格局。

**图1 川渝地区各县马先蒿物种丰富度**

Fig. 1 County-wise Species Richness of *Pedicularis* in Sichuan and Chongqing

通过统计川渝地区马先蒿在不同海拔高度上出现的频次（图2）发现，在海拔3 500 m以下，随着海拔高度的升高，马先蒿物种丰富度增加；在海拔3 500 m以上，随着海拔高度的升高，马先蒿物种丰富度降低。川渝地区马先蒿物种丰富度在海拔梯度的变化体现了“中间高度膨胀”(Whittaker，1960）的规律，在海拔3 500～4 000 m之间的高山地带种类最多，有140种。其次是在3 000～3 500 m的高山地带，有116种。海拔高度低于500 m和高于5 000 m的这两个高度段马先蒿物种数非常少，分别为3和2。

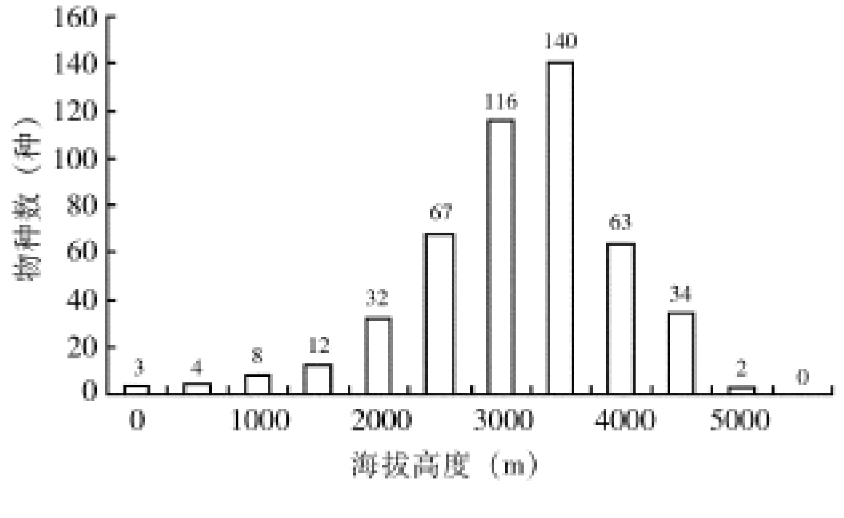


**图2 川渝地区不同海拔高度带马先蒿物种频次分布图**

Fig. 2 The sketch map of species richness of *Pedicularis* in different altitude belts

## 2.2 马先蒿属植物种丰富度与环境因子的关系

用SPSS8.0软件对进行标准化后的数据库进行因子分析，得到各因子特征值和贡献率表和旋转后因子载荷矩阵表（表1，2)。从表1中可以看出，所获得的18个综合因子中，前2个因子保留了原始变量总信息量的83.566%（表1)，用这2个因子来反映原始数据，所损失的信息只有16.434%。当保留原始变量总信息量80%时，所对应的因子体现了研究对象的基本面貌（徐建华，1992；裴鑫德，1991)，因此前两个因子是分布区中最主要的环境因子。前两个因子中，第一个因子所代表的原始信息量为74.629%，远大于第二个因子（8.937%)，因此对第一个因子的分析意义更大。

**表1 特征值和贡献率**

Table 1 Eigenvalue and Contribution

| 编号 | 特征值 | 贡献率(%) | 累计贡献率(%) |
|---|---|---|---|
| 1 | 14.179 | 74.629 | 74.629 |
| 2 | 1.698 | 8.937 | 83.566 |
| 3 | .944 | 4.969 | 88.535 |
| 4 | .553 | 2.911 | 91.446 |
| 5 | .442 | 2.328 | 93.774 |
| 6 | .347 | 1.828 | 95.603 |
| 7 | .236 | 1.241 | 96.843 |
| 8 | .148 | .779 | 97.623 |
| 9 | .115 | .607 | 98.230 |
| 10 | 7.916E-02 | .417 | 98.646 |
| 11 | 7.436E-02 | .391 | 99.038 |
| 12 | 5.832E-02 | .307 | 99.345 |
| 13 | 4.301E-02 | .226 | 99.571 |
| 14 | 3.024E-02 | .159 | 99.730 |
| 15 | 1.518E-02 | 7.992E-02 | 99.810 |
| 16 | 1.432E-02 | 7.535E-02 | 99.885 |
| 17 | 9.272E-03 | 4.880E-02 | 99.934 |
| 18 | 5.317E-03 | 2.799E-02 | 100.000 |

从表2可以看出，在因子1中，年均温、≥0℃积温、≥5℃积温、≥10℃积温、≥15℃积温、最冷月平均最低气温、最热月平均最高气温、一月均温、七月均温、海拔高度这些因子载荷较高，其中因子1与海拔高度呈负相关，而与其它因子都呈正（负）相关，而且都是温度因子。随着海拔的升高，各个单元格内的温度因子都呈下降趋势，在西部高原地区，通常海拔每升高1 000 m，气温下降6℃左右。因此可以认为第一因子是由海拔高度引起的温度变化的组合因子。马先蒿物种数随着第一因子数值的增加，呈降低的趋势。在因子2中，相对湿度、年降雨量、全年日照时数、地面温度和日较差这些因子载荷较高，其中因子2与相对湿度和年降雨量呈正相关，而与全年日照数和日较差呈负相关，即随着年降雨量的减少，日照时数的增加，相对湿度减小，地面温度增加，可见第二个主因子是光照和水分的组合因子。

表2　旋转后因子载荷矩阵

Table 2　Rotated factor loading matrix

| | 因子1 | 因子2 | | 因子1 | 因子2 | | 因子1 | 因子2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 马先蒿物种丰富度 | -.465 | -.484 | 最冷月平均最低气温 | .822 | .521 | 一月均温 | .909 | .293 |
| 日较差 | -.466 | -.833 | 年平均气温 | .906 | .382 | 七月均温 | .814 | .538 |
| ≥0℃积温 | .898 | .420 | ≥5℃积温 | .876 | .428 | 地面温度 | -.315 | -.825 |
| ≥10℃积温 | .896 | .394 | 相对湿度 | .221 | .927 | 熊蜂物种丰富度 | -.538 | -.247 |
| ≥15℃积温 | .821 | .483 | 年降雨量 | .139 | .786 | 海拔 | -.729 | -.650 |
| 最热月平均最高气温 | .791 | -4.601E-02 | 全年日照时数 | -.315 | -.825 | 七月最低温度 | -.465 | -.484 |

因子分析揭示出影响马先蒿属种丰富度的两大主要因子是温度和水热因子，但这两个因子包括了较多的其它成分，为了进一步探讨温度和水热因子中对马先蒿多样性分布格局影响最大的成分，依托SPSS8.0软件，用简单相关分析法分析马先蒿物种丰富度与表2中列出的17个因子的相关性，得到马先蒿丰富度和各环境因子相关矩阵（表3)。

表3　马先蒿丰富度和各环境因子的相关矩阵

Table 3　Correlation matrix of environmental variables and species richness of *Pedicularis*

| 代码 | 因子 | 相关系数 | 显著性概率水平 |
|---|---|---|---|
| X1 | ≥0℃积温 | -0.606 | 0.01 |
| X2 | ≥5℃积温 | -0.590 | 0.01 |
| X3 | ≥10℃积温 | -0.599 | 0.01 |
| X4 | ≥15℃积温 | -0.632 | 0.01 |
| X5 | 最热月平均最高气温 | -0.303 | 0.01 |
| X6 | 最冷月平均最低气温 | -0.577 | 0.01 |
| X7 | 七月最低温 | -0.610 | 0.01 |
| X8 | 一月平均温度 | -0.512 | 0.01 |
| X9 | 七月平均温度 | -0.609 | 0.01 |
| X10 | 年平均气温 | -0.564 | 0.01 |
| X11 | 地面温度 | -0.566 | 0.01 |
| X12 | 年降雨量 | -0.406 | 0.01 |
| X13 | 相对湿度 | 0.513 | 0.01 |
| X14 | 平均日较差 | 0.555 | 0.01 |
| X15 | 全年日照时数 | 0.477 | 0.01 |
| X16 | 海拔高度 | 0.625 | 0.01 |
| X17 | 熊蜂物种数 | 0.625 | 0.01 |

从表3可以看出，非生物因子中≥15℃积温、七月最低温、七月均温、海拔高度对马先蒿的物种丰富度影响最大，而生物因子就只有熊蜂物种丰富度。因此，采用马先蒿物种丰富度与≥15℃积温、七月最低温、七月均温、海拔高度、植被类型数、熊蜂物种丰富度分别求偏相关。结果表明，马先蒿物种丰富度与熊蜂物种丰富度关系最密切，相关系数为0.264，显著性水平为千分之一；其次是海拔高度，相关系数为0.2503，假设不成立的概率为0.3%；与≥15℃积温的相关系数为-0.1791，不相关的概率为3.2%；与七月最低温、七月均温没有线性关系（表4)。这一结果与简单相关分析的结果并不完全一致，说明了在生态因子分析中，考虑各因子综合作用的重要性。综合两种分析结果，影响马先蒿多样性分布的因子最重要的是熊蜂，其次是海拔高度和≥15℃积温。马先蒿物种多样性随着熊蜂物种数和海拔高度的增大而增大，随着≥15℃积温的降低而增大。

马先蒿和熊蜂物种丰富度呈正相关（表3)。熊蜂是马先蒿最有效的传粉昆虫（Macior，1982)，两者之间存在紧密的协同进化关系，它们在相似的自然环境表现出最高的物种多样性，反映它们对相似环境的适应。熊蜂也主要分布在亚高山、高山草甸和沼泽草甸、沼泽植被，且熊蜂是马先蒿在该区域几乎唯一有效的传粉昆虫。马先蒿和熊蜂都集中分布于海拔3 000～4 000 m的高度范围内，都喜欢湿冷的气候，都集中分布在川渝西部地区，而在川渝东部盆地地区分布甚少。

马先蒿属在海拔3 500～4 000 m之间的高山地带种类最多，该高度段位于高山灌丛草甸带，表明该高度段气候条件能满足马先蒿正常生长、开花和结实。马先蒿的有效传粉昆虫熊蜂也是在3 000～4 000 m海拔高度段物种丰富度最高（道里刚，2004)，说明在此海拔高度范围内，有充足的传粉者为马先蒿传粉，能产生足够多的种子，

表4　马先蒿物种丰富度与6个因子的偏相关综合结果

Table 4　The result of partial correlation matrix of environmental variables and species richness of *Pedicularis*

| | ≥0℃积温 | 七月均温 | 七月最低温 | 海拔 | ≥15℃积温 | 熊蜂 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 马先蒿物种丰富度 | 0.0583 | -0.0194 | 0.0003 | 0.2503 | -0.1791 | 0.264 |
| 显著性水平（P) | 0.489 | 0.818 | 0.997 | 0.003 | 0.032 | 0.001 |

繁衍下一代。其次是在3 000～3 500 m的亚高山针叶林带，该高度段分布着多种森林成分的马先蒿。由于气候条件不适宜马先蒿生长、繁殖，或者缺乏有效的传粉者，海拔高度低于500 m和高于5 000 m的这两个高度段马先蒿物种数非常低，分别为3和2，实际上，>5 000 m的种类可能还更多，但由于>5 000 m的地方较少进行标本采集工作，所以这一高度段有采集到的马先蒿纪录比较少。

马先蒿物种丰富度与年均温、≥0℃积温、≥5℃积温、≥10℃积温、≥15℃积温、最冷月平均最低气温、最热月平均最高气温、一月均温、七月均温、地面温度和7月最低温呈负相关(表3)。随着地理单元格内这些温度因子数值的升高，马先蒿物种丰富度降低，说明马先蒿喜好寒冷的环境。就植物对温度的反应而言，各种植物都有其最适温度。据研究，嗜冷植物适应在15℃以下的环境中生长，嗜温植物适应于30～45℃，嗜中温植物则适应于20～35℃（殷秀琴，2004），说明马先蒿是嗜冷植物。从马先蒿物种丰富度与6个因子的偏相关综合结果（表4）可以看出各个温度因子中仅有≥15℃积温与马先蒿的物种丰富度存在真正的线性关系。≥15℃积温数值越大，马先蒿属物种丰富度越小，表明日平均≥15℃的天数多，会影响马先蒿生长发育，如在马先蒿集中分布的康定，≥15℃积温为468.8℃，冬季长达6个半月，年平均气温9℃；种类集中分布的红原、阿坝、理塘地区，≥15℃积温为0℃、42℃、0℃，年平均气温0～6℃，全年无夏，冬季长达6个半月至9个半月以上，最低气温达-30℃以下；而几乎没有马先蒿分布的东部盆地属于亚热带湿润型气候，≥15℃积温为3 000～5 000℃，日均温大于10℃的持续期长达八、九个月，日平均气温大于12℃的开始期至大于20℃的终止期间隔日数180～200天；冬无严寒，最低气温很少降到0℃以下（四川省测绘局，1984），说明持续高温的天气是影响马先蒿正常生长的主要原因。

人类活动对马先蒿属物种多样性分布格局也有一定的影响，频繁的人类活动加速了植被的退化，对森林的乱砍滥伐、毁林开荒使一些森林成分的马先蒿减少甚至消失。川渝东部地区人口稠密，工农业发达，植被破坏程度远远大于人口稀少、工农业落后的西部山区，随着工农业的发展，土地利用方式频繁改变，使东部地区马先蒿属的一些种类被迫迁移因此而灭绝，这也可能是马先蒿属在川渝西部地区物种数相对丰富的原因之一。西部地区退耕还林还草政策的执行，也给马先蒿属生长提供了有利的环境条件，马先蒿属植物大量出现在退耕还林的山地缓坡、弃耕多年的撂荒地上。我们在四川省美姑县、红原县做野外调查发现，许多种马先蒿密集分布于弃耕地上，如密穗马先蒿（*P. densispica*）、狐尾马先蒿（*P. alopecuros*）。此外，川西地区植被或植物调查与标本采集强度比较高，而东部盆地内部与高山上部（4 500～4 700 m以上）强度低，这对川渝地区马先蒿属种丰富度呈现西高东低分布格局有一定影响。

## 3 结论

水平分布上，马先蒿物种丰富度在川渝地区呈现出西高东低的分布格局。垂直分布上，在海拔3 500 m以下，随着海拔高度的升高，马先蒿物种丰富度增加；在海拔3 500 m以上，随着海拔高度的升高，马先蒿物种丰富度降低，在海拔梯度的变化上体现了“中间高度膨胀”的规律。

因子分析揭示出影响马先蒿属物种丰富度的两大主要因子是温度和水热因子，但其中熊蜂物种丰富度、海拔高度和≥15℃积温依次是影响川渝地区马先蒿物种丰富度和多样性分布格局最重要的环境因子，这也是本属植物在长期进化过程中形成的适应性特点，尤其是马先蒿属植物喜好寒冷的高海拔地区的特性决定其分布格局的特殊性。分析结果与空间分布体现的地理分布特征基本一致。川渝地区在大地构造上分成西部高原和东部盆地两大部分，西部多高山，气候较寒冷；而东部海拔低，气候较温暖，因此马先蒿物种丰富度在川渝地区呈现出西高东低的分布格局。在诸多温度因子中，≥15℃积温对马先蒿多样性分布影响最大，且和马先蒿物种丰富度呈负相关，表明马先蒿不能在长时间的温暖环境下正常生长，这也与其喜好高海拔地区寒冷的环境相一致。马先蒿物种丰富度与熊蜂物种丰富度在川渝地区均呈现出西高东低的分布格局（道里刚，

2004)。马先蒿属物种丰富度在海拔 3 500～4 000 m 之间的高山地带种类最高，有 140 种，熊蜂也是在此海拔高度段物种丰富度最高（道里刚，2004），说明熊蜂对马先蒿的繁殖起关键作用，因此有马先蒿分布的地区应该有熊蜂分布。

此外，人类活动强度、土地利用方式的改变、政策法规的颁布执行以及标本采集强度对川渝地区马先蒿属种丰富度呈现西高东低分布格局都有一定的贡献。

## 〔参　考　文　献〕


四川省测绘局，1984．四川省地图册［M］．成都：四川省测绘局

Cai QM（蔡启铭），Gao XY（高锡芸），Chen YW（陈宇炜），1995．Dynamic variation of water quality in Taihu Lake and multivariate analysis of its influential factors［J］．*J Lake Sci*（湖泊科学），**7**（2）：97—106

Dao LG（道里刚），2004．Geographical pattern of species diversity of *Bombus* in Sichuan and Chongqing and its relationship with main environmental factors［D］．Chengdu：Sichuan University

Li HL（李惠林），1948．Vision of the genus *Pedicularis* in China．Part Ⅰ［M］．Proc Acad Nat Sci Philadephia，**100**：205—378

Li HL（李惠林），1949．A revision of the genus *Pedicularis* in China．Part Ⅱ［M］．Proc Acard Nat Sci Philadephia，**101**：1—214

Lv HC（吕唤春），Chen YX（陈英旭），Fang ZF（方志发），2002．Evaluation on dominated factors of nutrient matters in Qiandao Lake［J］．*Agro-Environ Protect*（农业环境保护），**21**（4）：318—321

Macior LW，1982．Plant community and pollinator dynamics in the evolution of pollination mechanisms in *Pedicularis*（Scrophulariaceae）［A］．In：Armstrong JA，Powell JM，Richards A Jeds．Pollination and Evolution［M］．Sydney：Royal Botanic Gardens，29—45

Mill RR，2001．Notes relation to the flora of Bhutan XL Scrophulariaceae（*Pedicularis*）［J］．*Edinb J Bot*，**58**：7—59

Pei XD（裴鑫德），1991．Multivariate Statistical Analysis and Applications［M］．Beijing：China Agriculture University Press，25—38

SiMa YK（司马永康），Yu H（余鸿），Yang GY（杨桂英）*et al*．2004．The relation between Yunnan Georgraphic distribution of *Cephalotaxus* and environment［J］．*Forest Inventory Plann*（林业调查规划），**29**（1）：83—87

Tsoong PC（钟补求），1955．A new system for the genus *Pedicularis*［J］．*Acta Phytotax Sin*（植物分类学报），**4**：71—147

Tsoong PC（钟补求），1956a．A new system for the genus *Pedicularis*（continued）［J］．*Acta Phytotax Sin*（植物分类学报），**5**（1）：19—73

Tsoong PC（钟补求），1956b．A new system for the genus *Pedicularis*（continued）［J］．*Acta Phytotax Sin*（植物分类学报），**5**（4）：205—278

Tsoong PC（钟补求），1963．*Pedicularis*［A］．In：Flora Reipublicae Popularis Tomus 68［M］．Beijing：Science Press

Wang H（王红），Li DZ（李德铢），1999．The species diversity and phytogeography of *Pedicularis*（Scrophulariaceae）in Gaoligong Mountains，NW Yunnan［J］．*Acta Bot Yunnan*（云南植物研究），**Supple XI**：35—43

Wang FT（王馥棠），2003．Climatic Change and Its Relationship with Agriculture［M］．Beijing：Meteorology Publisher

Whittaker RH，1960．Vegetation of the siskiyou mountains，Oregon and California［J］．*Ecol Monogr*，**30**（3）：279—338

Xu JH（徐建华），1992．Mathematical Methods in Modern Geography［M］．Beijing：Higher Education Press，39—45

Yang YH（杨元合），2004．Plant species richness of grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau［J］．*Biodivers Sci*，**12**（1）：200—205

Yin XQ（殷秀琴），2004．Bio-geography［M］．Beijing：Higher Education Press

Yu SX（于书霞），Shang JC（尚金城），Zhao JS（赵劲松）*et al*．2001．Factor analysis and dynamics of water quality of Songhua River［J］．*Soil Environ Sci*，**10**（4）：277—281